干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.03.17

科尔沁沙地退化植被恢复过程中碳氮化学计量特征的变化[①]

吕　朋[1,2,3]，　左小安[1,2]，　孙珊珊[1,3]，　张　晶[1,2,3]，　赵生龙[2,3]，
程清平[2,3]，　胡　亚[2,3]

（1　中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站，甘肃　兰州　730000；　2　中国科学院西北生态环境资源研究院乌拉特荒漠草原研究站，甘肃　兰州　730000；　3　中国科学院大学，北京　100049）

摘　要：为研究沙地退化植被恢复过程中碳氮化学计量特征的变化，分别于2011年、2013年和2015年8月中旬对流动、半固定、固定沙丘和草地进行植被调查，并测定植被—土壤系统的碳氮化学计量特征。结果表明：(1)随着沙地退化植被的恢复，地上植物、凋落物和根系的C、N含量及C/N比波动变化，土壤(0～10 cm)C和N含量及C/N比显著增加($P<0.05$)。(2)沙地4种生境上的地上植物、凋落物、根系、土壤的C、N含量及C/N比年际间变化显著($P<0.05$)。(3)沙地退化植被恢复过程中地上植物、凋落物、土壤的C/N比与物种丰富度呈正线性关系($P<0.01$)。沙地退化植被恢复过程中优势植物演替导致植被—土壤系统中C、N化学计量特征的变化，植被恢复过程中植物的氮素利用效率也在逐渐增强，而封育时间的增加能够促进沙地土壤中N的积累。

关键词： C、N含量；C/N比；退化植被恢复；恢复年限；科尔沁沙地
文章编号： 1000－6060(2019)03－0606－09(0606～0614)

生态化学计量特征现已成为国际生态学研究的热点问题之一，是度量植物利用养分和土壤养分供给能力的主要指标。近年来，国内外生态学家对生态化学计量学开展了多方面的研究，主要集中在全球气候变化[1]、放牧[2]对生态化学计量特征的影响以及不同生态系统[3-5]、不同研究尺度[6]的碳氮化学计量特征等方面。退化植被恢复过程中，植被—土壤系统的C、N化学计量特征发生明显变化。刘梦云[7]的研究指出，退化植被不同恢复阶段土壤有机碳及总碳存在显著差异，退化植被恢复较大程度上提高了土壤的碳含量。秦海[8]的研究表明，随着退化植被恢复，植物叶片N含量显著增加，植物叶片C/N比变化不显著。近年来，对退化植被恢复过程中C、N化学计量特征的研究主要集中在植被恢复对土壤C、N化学计量特征的影响[9-11]。生态化学计量学不仅在群落的结构以及动态研究[12-14]中具有重要作用，而且在生态系统的养分循环以及供求关系的平衡[15-16]、全球的生物地球化学循环[17]等方面也发挥着重要作用。

近年来，由于人类不合理的活动导致科尔沁沙地的植被遭到严重破坏，进而发生了不同程度的沙漠化[18]。但该地区的水热耦合条件较为良好，同时又具有可观数量的天然种源，随着围栏封育、退耕还草等保护性措施的实施，原有的退化植被逐渐恢复、流动沙丘逐渐固定，沙漠化进程得到有效遏制并呈现出整体逆转的趋势[19]。沙漠化的逆转不仅改变了沙地的植被类型及其群落组成，也影响了土壤的发育、植被与土壤之间的碳氮循环过程及其生态效应。在科尔沁沙地退化植被恢复过程中，有关生态化学计量特征的研究较少，主要集中在植物的C、N、P含量的变化等方面[20-21]。尽管国内外生态学家对生态化学计量学进行了大量的研究，但有关沙漠化地区植被—土壤系统碳氮化学计量特征的时空动态基础数据仍然缺乏。国内学者对植物、根系、土

① **收稿日期：**2018－11－15；　**修订日期：**2019－01－25
基金项目：国家自然科学基金项目(41571106，41622103)；国家重点研发计划重点专项课题(2016YFC0500506)共同资助
作者简介：吕朋(1989－)，男，博士研究生，研究方向为恢复生态学. E-mail：lvpengsnake@163.com
通讯作者：左小安. E-mail：zuoxa@lzb.ac.cn

壤的碳氮化学计量特征研究较多,而对其时空动态变化研究相对较少。因此,本文初步研究了沙地退化植被恢复及其恢复年限对植被—土壤系统碳氮化学计量特征的影响,从而为半干旱沙地生态系统退化植被的恢复及其可持续管理提供一定的科学依据和实践支持,也为化学计量学的发展提供一定的理论基础。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古通辽市奈曼旗(42°55′~42°57′ N,120°40′~120°43′ E)境内,地处科尔沁沙地中南部,海拔高度约为 360 m。该区域年均气温 6.4 ℃,全年≥10 ℃的有效积温在 3 000 ℃以上,无霜期 150 d,全年平均降雨量约 360 mm(其中降水量的 70% ~80% 集中在 6~8 月份),而年均蒸发量约 1 972.8 mm。该研究区域流动沙丘、半流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、丘间低地等各种沙丘类型交错分布,而土壤类型则以栗钙土和风沙土为主。沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)在流动沙丘中占优势;差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、大果虫实(*Corispermum macrocarpum*)在半固定沙丘中占优势;黄蒿(*Artemisia scoparia*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)在固定沙丘中占优势;而黄蒿、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等在沙质草地中占优势[22]。

1.2　研究方法

1.2.1　样地选择及植被和土壤样品的取样方法

选择奈曼站长期动态监测的 4 种典型生境类型—流动沙丘(MD)、半固定沙丘(SFD)、固定沙丘(FD)和沙质草地(G)作为研究样地,其中流动沙丘经自然封育恢复后(1995 年起)形成半固定沙丘,而固定沙丘也由流动沙丘经自然封育恢复(1980 年起)而成。随机选择了 24 个大小为 20 m×20 m 的研究样地,每种生境类型 6 个重复,各样地间的距离为 0.5~8 km。于 2011 年、2013 年和 2015 年的 8 月中旬,在每个样地内分别随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方,并在每个样方内分别进行植物、凋落物、根系、土壤的取样:用收割法分物种获得植物样,同时收取凋落物,装入信封后烘干称重(65 ℃,48 h);植物、凋落物取样完成后,再用根钻(直径 10 cm)分层(0~10 cm,10~20 cm,20~40 cm,40~60 cm)钻取土壤根系(3 钻混合),装入网袋后带回实验室冲洗,并烘干至恒重(65 ℃);同时用直径为 3 cm 的土钻,分层(0~10cm,10~20 cm,20~40 cm,40~60 cm)钻取 1 个土壤样品(3 钻混合),自然风干后过 2 mm 筛[22]。烘干后的地上植物、凋落物、根系经粉碎机粉碎以及风干土样经球磨仪研磨后,用元素分析仪(Costech ECS 4010,意大利)测定各植物、土壤样品的 C、N 含量。

1.2.2　数据处理

采用两因素方差分析对退化植被恢复过程中的生境变化和封育恢复时间对 C、N 化学计量特征的影响进行差异性比较($P<0.05$),采用 LSD 法进行多重比较。沙地退化植被恢复过程中物种丰富度和碳氮化学计量特征的关系采用线性回归模型分析。

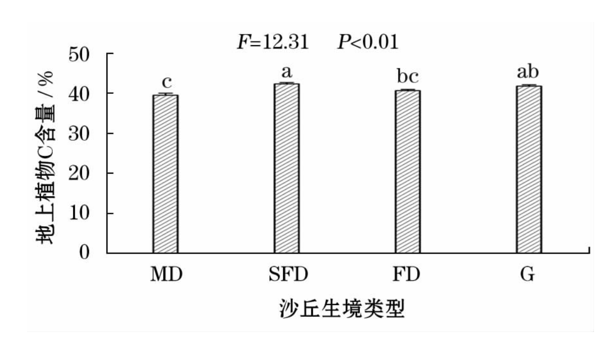
数据整理及图表制作采用 Excel 2016、Origin 8.0,多元统计分析采用 SPSS 19.0。

2　结果与分析

2.1　沙地退化植被恢复过程中 C、N 化学计量特征的变化

在沙地退化植被恢复过程中,流动、半固定、固定沙丘和草地的地上植物 C 含量分别为 39.47%、42.29%、40.61% 和 41.73%,半固定沙丘地上植物 C 含量最高。而 2011—2015 年,沙地 4 种生境上平均地上植物 C 含量年际间变化不显著($P>0.05$)(图 1)。随着沙地退化植被的恢复,地上植物 C 含量波动变化,而沙地 4 种生境上的平均地上植物 C 含量相对稳定。

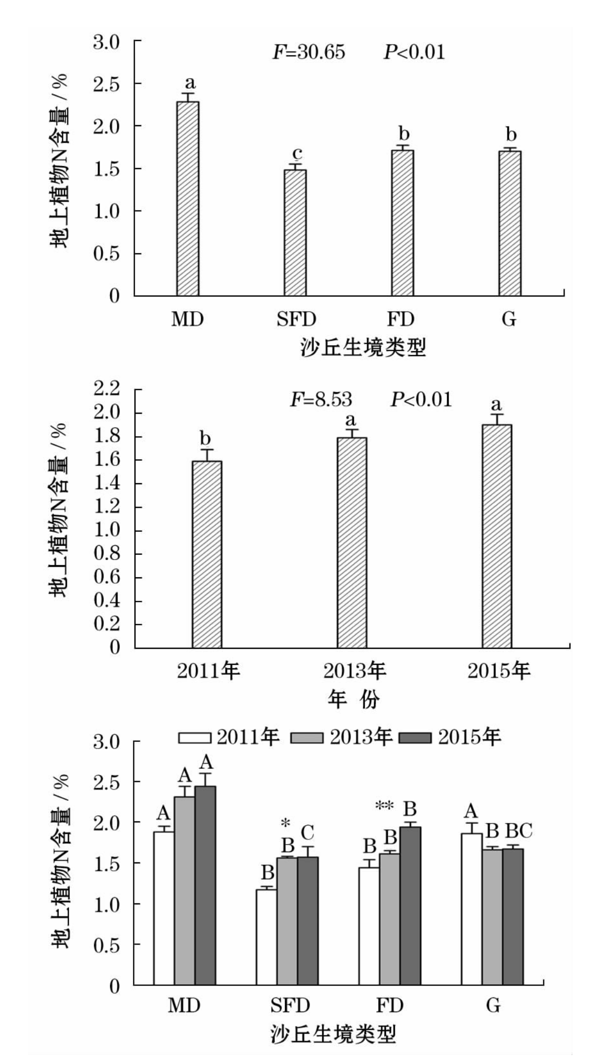
随着沙地退化植被的恢复,地上植物 N 含量表现为流动沙丘>固定沙丘和草地>半固定沙丘,流



注:生境间的差异性用小写字母表示($P<0.05$)

图 1　沙地退化植被恢复过程中地上植物 C 含量的变化

Fig. 1　Changes of plant C content in the restoration of degraded vegetation



注:生境或年份之间的差异性用小写字母表示,同一年份下,生境间的差异性用大写字母表示($P<0.05$);同一生境下,年份间的差异性用*($P<0.05$)或**($P<0.01$)表示,未标星号即为差异不显著

图2 沙地退化植被恢复过程中地上植物N含量的变化

Fig. 2 Changes of plant N content in the restoration of degraded vegetation

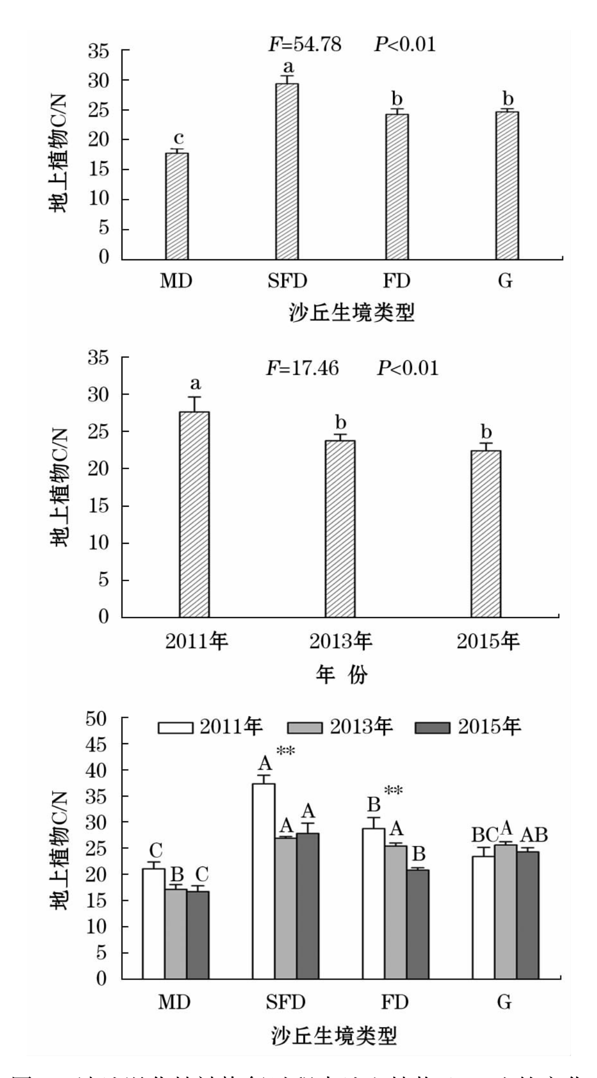


图3 沙地退化植被恢复过程中地上植物C/N比的变化

Fig. 3 Changes of plant C/N ratio in the restoration of degraded vegetation

动沙丘地上植物N含量为2.28%。2011—2015年,沙地4种生境上平均地上植物N含量逐渐增加,尤其是半固定、固定沙丘的地上植物N含量显著增加(图2)。在沙地退化植被恢复过程中,地上植物N含量有所下降,但5 a的封育恢复使得沙地生态系统地上植物N含量明显增加。

由流动沙丘封育恢复到半固定、固定沙丘和草地的过程中,地上植物的C/N比表现为半固定沙丘>固定沙丘和草地>流动沙丘。2011—2015年,沙地4种生境上平均地上植物C/N比明显降低,特别是半固定和固定沙丘的地上植物C/N比显著减小(图3)。因此,随着退化植被的恢复,半固定、固定沙丘和草地的地上植物C/N比比流动沙丘有所增加,但就沙地生态系统整体而言,地上植物C/N比随封育恢复时间明显下降。

在沙地退化植被恢复的过程中,半固定、固定沙丘和草地的凋落物C含量分别为43.87%、37.44%和40.79%。2011—2015年,沙地4种生境上的平均凋落物C含量波动性变化,2013年最高,达到42.43%(图4)。随着沙地退化植被的恢复,凋落物C含量有下降趋势,在固定沙丘中最低;而5 a的封育恢复过程中沙地生态系统凋落物C含量波动变化。

随着沙地退化植被的恢复,半固定、固定沙丘和草地的凋落物N含量分别为0.97%、1.15%、1.16%,固定沙丘和草地的凋落物N含量约为半固定沙丘的1.2倍。2011—2015年,沙地4种生境上平均凋落物N含量波动变化(图5)。在沙地退化植

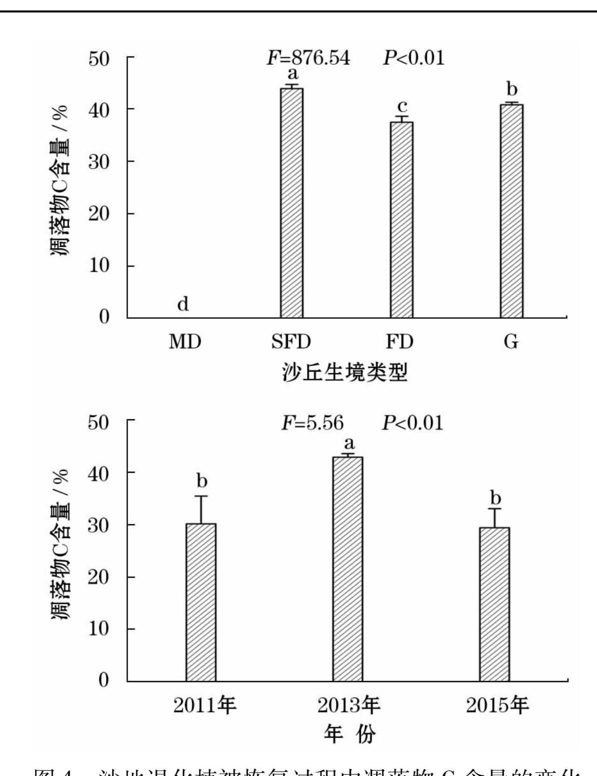


图 4　沙地退化植被恢复过程中凋落物 C 含量的变化

Fig. 4　Changes of litter C content in the restoration of degraded vegetation

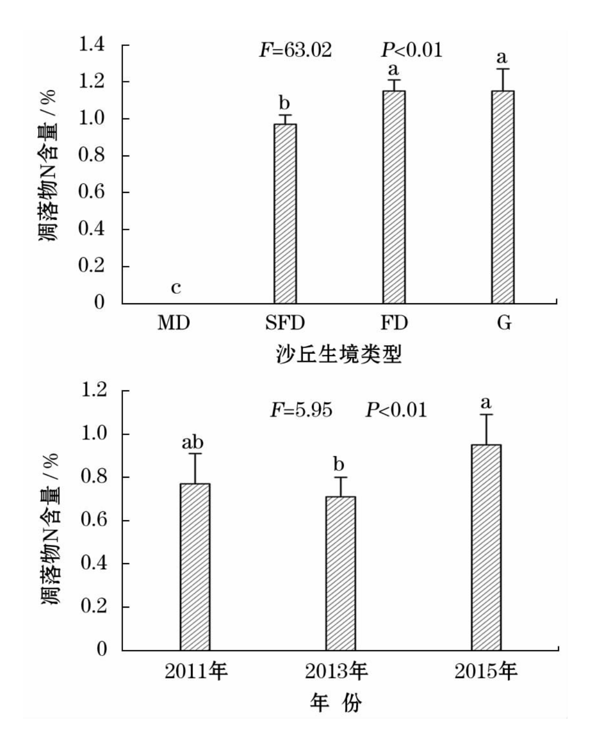


图 5　沙地退化植被恢复过程中凋落物 N 含量的变化

Fig. 5　Changes of litter N content in the restoration of degraded vegetation

被恢复的过程中,凋落物 N 含量有逐渐增加的趋势,沙地 4 种生境上平均凋落物 N 含量在 5 a 的封育恢复过程中基本保持不变。

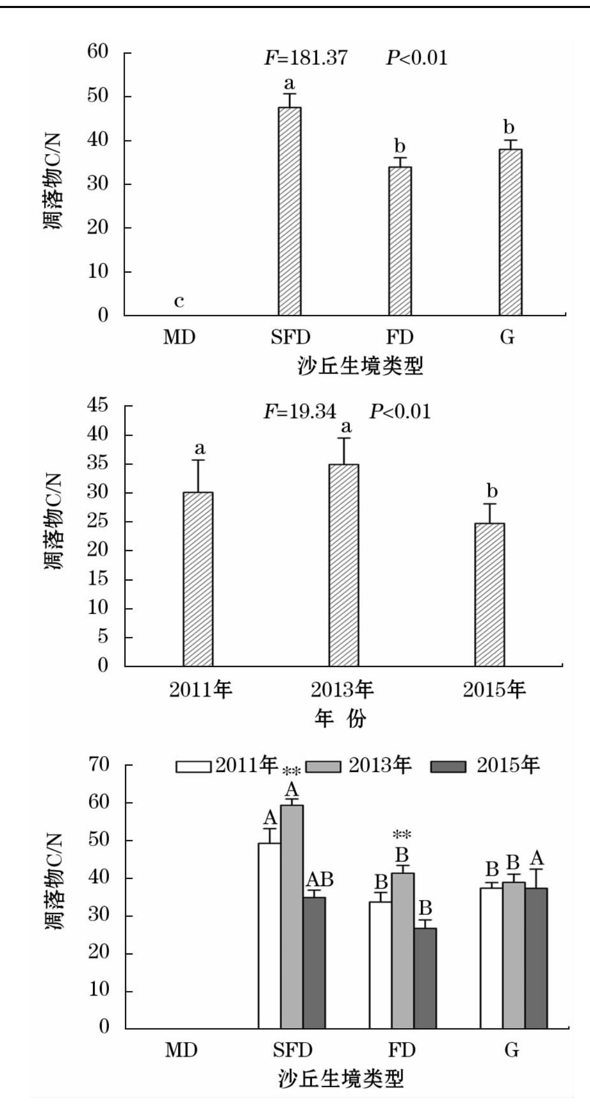


图 6　沙地退化植被恢复过程中凋落物 C/N 比的变化

Fig. 6　Changes of litter C/N ratio in the restoration of degraded vegetation

沙地退化植被恢复过程中,半固定沙丘凋落物的 C/N 比大于固定沙丘和草地,其凋落物的 C/N 比达到 47.53。2011—2015 年,沙地 4 种生境上平均凋落物 C/N 比波动性变化,2015 年最低,其中半固定和固定沙丘的凋落物 C/N 比变化显著($P<0.01$)(图 6)。沙地退化植被恢复的过程中,凋落物 C/N 比有所下降,而 5 a 的封育恢复过程中沙地 4 种生境上平均凋落物 C/N 比有下降趋势。

流动、半固定、固定沙丘和沙质草地的根系(0 ~ 10 cm) C 含量分别为 39.91%、44.63%、42.74% 和 41.64%,半固定沙丘的根系 N 含量最小,导致了其 C/N 比最大。2011—2015 年,地下根系 C/N 比呈下降的趋势(图 7)。随着植被恢复,根系 C 含量波动变化,半固定沙丘的根系 N 含量最小、C/N 比最大;而在 5 a 的封育恢复过程中,沙地 4

种生境上平均根系 C/N 比明显降低。

沙地退化植被恢复过程中,土壤(0～10 cm)的 C 含量表现为草地 > 固定沙丘 > 半固定沙丘和流动沙丘,由流动沙丘到草地,土壤的 C 含量增加了 10.12倍。2011—2015 年,土壤的 C 含量表现出波动增加趋势(图 8)。随着沙地退化植被的恢复, 土壤 C 含量逐渐增加,在 5 a 的封育恢复过程中沙地生态系统土壤的 C 含量呈增加趋势。

随着沙地退化植被的恢复,土壤 N 含量(0～10 cm)表现为草地 > 固定沙丘 > 半固定沙丘和流动沙丘,由流动沙丘到草地土壤 N 含量增加了 6.12 倍。2011—2015 年,土壤 N 含量明显增加,尤其是半固定、固定沙丘和草地的土壤 N 含量显著增加(图 9)。因此,在沙地退化植被恢复的过程中,土壤的 N 含量逐渐增加,5 a 的封育恢复促进了土壤 N 含量的持续积累。

流动、半固定、固定沙丘和沙质草地的土壤(0～10 cm)C/N 比分别为5.33、5.73、7.08 和7.30。2011—2015 年,沙地四种生境上平均土壤 C/N 比波动变化,2013 年最高(图 10)。随着沙地退化植被的恢复,土壤的 C/N 比有逐渐增加的趋势,而5 a 的封育恢复过程中土壤的 C/N 比波动变化。

2.2 沙地退化植被恢复过程中 C、N 化学计量特征与物种丰富度的关系

在沙地退化植被的恢复过程中,物种丰富度与地上植物、凋落物、土壤(0～10cm)的C/N比均成

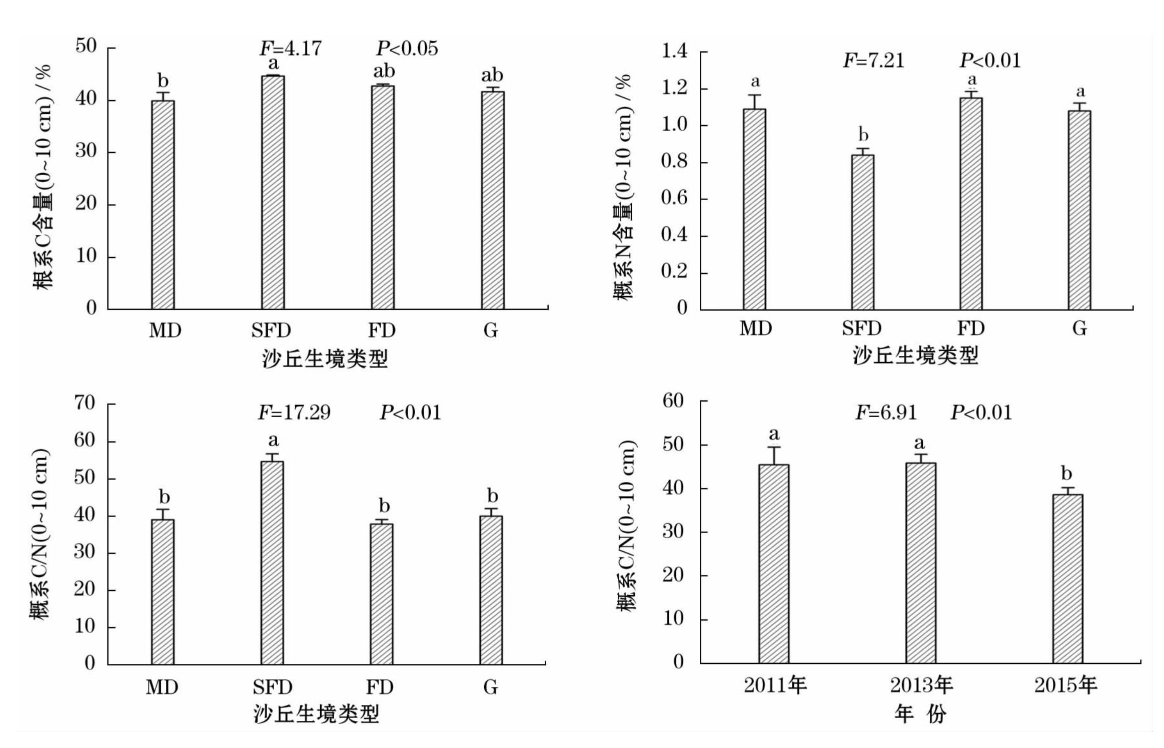


图 7 沙地退化植被恢复过程中地下根系 C、N 含量及其 C/N 比的变化(0～10 cm)

Fig. 7 Changes of root C and N contents and C/N ratio in the restoration of degraded vegetation (0～10 cm)

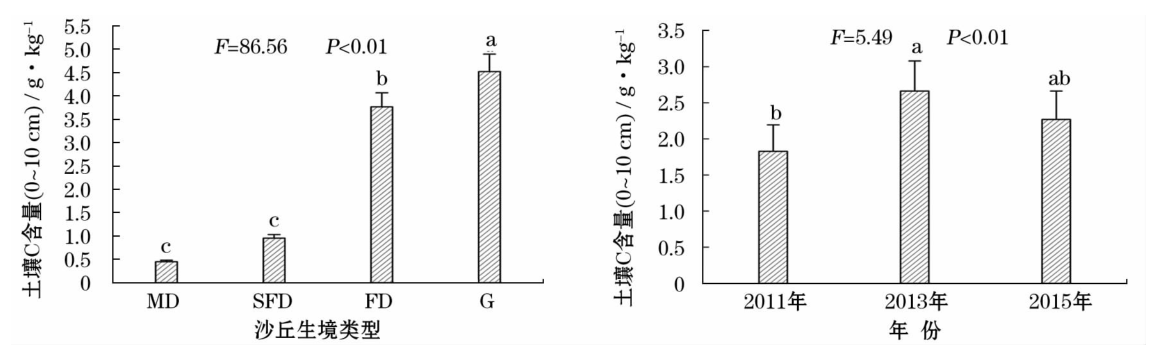


图 8 沙地退化植被恢复过程中土壤 C 含量的变化(0～10 cm)

Fig. 8 Changes of soil C content in the restoration of degraded vegetation (0～10 cm)

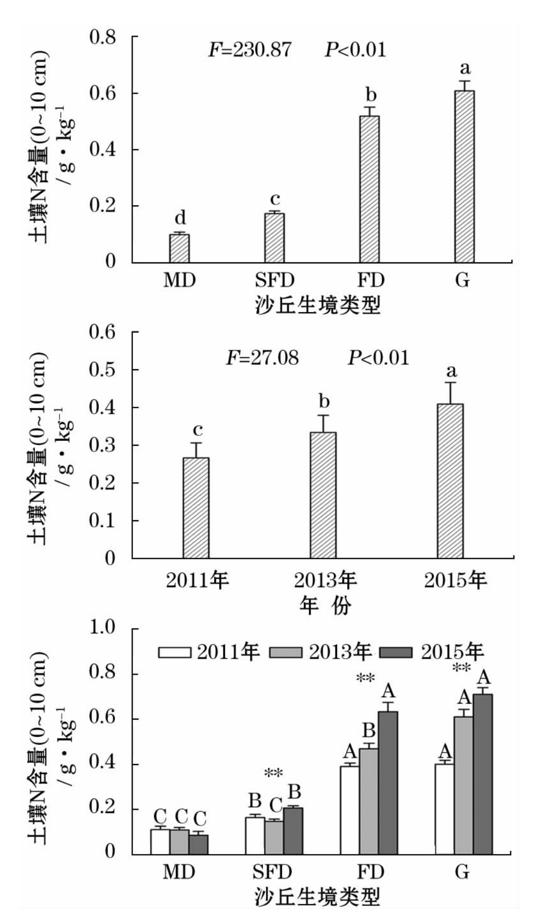


图 9　沙地退化植被恢复过程中土壤 N 含量的变化(0 ~ 10 cm)

Fig. 9　Changes of soil N content in the restoration of degraded vegetation (0 ~ 10 cm)

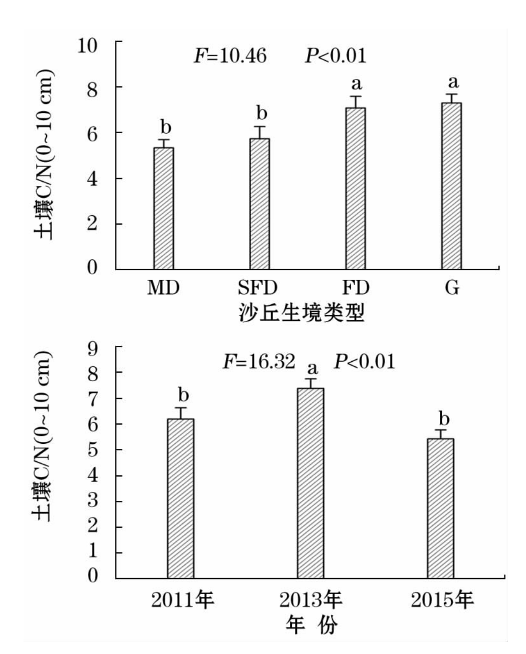


图 10　沙地退化植被恢复过程中土壤 C/N 比的变化(0 ~ 10 cm)

Fig. 10　Changes of soil C/N ratio in the restoration of degraded vegetation (0 ~ 10 cm)

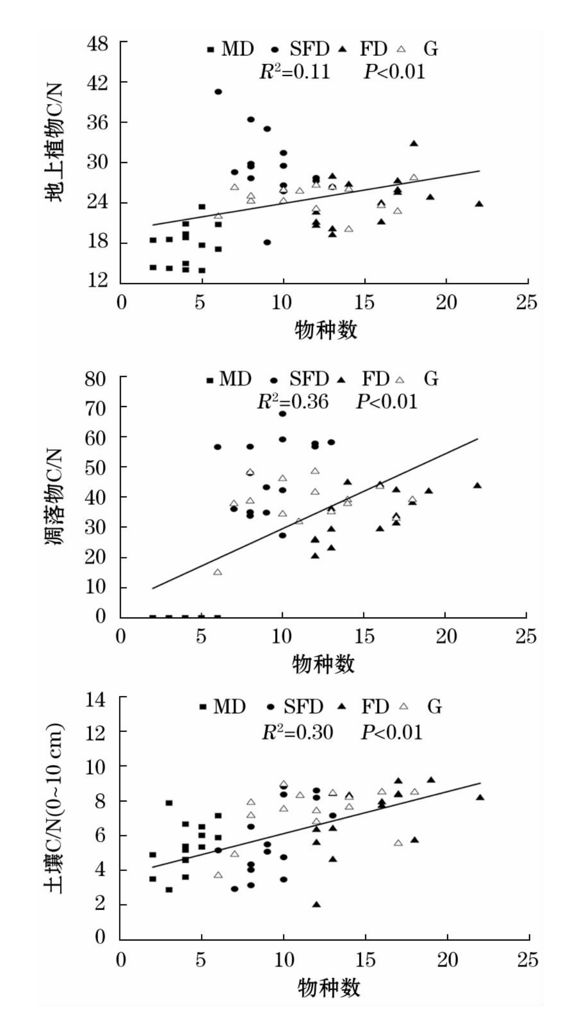


图 11　退化植被恢复过程中植被—土壤系统 C、N 化学计量特征与物种丰富度的相关关系

Fig. 11　Correlativity between C and N stoichiometry of plant-soil system and species richness in the restoration of degraded vegetation

极显著的正线性关系($P<0.01$),而与根系的 C/N 比没有显著的相关关系。物种丰富度分别可以解释地上植物、凋落物、土壤 C/N 比的 11%、36% 和 30% 的变异(图 11)。在沙地退化植被恢复过程中,植物群落的组成变化对植被—土壤系统的 C、N 化学计量特征具有重要影响。

3　讨　论

3.1　沙地退化植被恢复对植被—土壤系统碳氮化学计量特征的影响

在沙地退化植被恢复的过程中,植物群落物种组成发生改变,植物的光合作用方式(如 C_3、C_4 植物)以及对土壤中养分的利用方式也发生了一定变化,从而使得植物群落的养分分配及土壤内 C、N 含

量发生变化[23-25]。退化植被的恢复,增加了土壤有机碳的积累,而土壤的 C/N 比是影响土壤有机碳转化和反映植物碳氮关系的关键因素之一[26]。研究表明,随着退化植被的恢复,地上植物 C 含量波动变化,地上植物 N 含量变化趋势与其 C 含量的变化趋势相反,地上植物的 C/N 比表现为流动沙丘最低、半固定沙丘最高;半固定沙丘的凋落物 C 含量均高于草地和固定沙丘,半固定沙丘的凋落物 C/N 比最高;而地下根系 C、N 含量及其 C/N 比与地上植物的变化大体一致。科尔沁沙地退化植被恢复过程中,首先由流动沙丘的先锋植物种沙米群落向半固定沙丘差巴嘎蒿群落演替,进而再向固定沙丘中一年生和多年生草本群落演替。在演替的过程中,优势植物发生改变,从而影响了植被系统的碳氮化学计量特征。沙地植物为适应环境变化形成了特定的性状并改变了其化学组成,半固定沙丘优势物种差巴嘎蒿灌木的植物 C 含量较高,而流动沙丘优势物种沙米的植物 N 含量较高[27],从而导致了流动沙丘到半固定沙丘植物 C/N 比的变化。研究表明,随着退化植被的恢复,土壤碳氮含量逐渐增加,这与先前的研究结果相一致[28]。退化植被恢复过程中,草本植物凋落物及其死根对土壤碳氮含量具有重要影响[29],同时随着植物生物量的增加,土壤碳氮含量也明显提高[30]。

3.2 沙地退化植被恢复过程中物种丰富度的变化对植被—土壤系统 C/N 比的影响

植物与植物之间、植物与环境之间的相互作用能影响植物群落物种多样性的变化,植物与植物之间的相互竞争、光照条件、水分及养分状况是最重要的影响因素。就植物养分而言,氮、磷的不足及其引起的二者相对比率的变化范围超过一定的限度就会限制植物的生长,从而影响植物密度,进一步影响植物多样性的变化。沙地退化植被恢复过程中的 C、N 化学计量特征与物种丰富度的回归分析结果表明,地上植物、凋落物和土壤的 C/N 比与物种丰富度具有正线性关系。因此,沙地退化植被过程中的植物群落组成的改变对 C、N 化学计量特征具有重要影响,也进一步说明沙地退化植被恢复过程中植物 N 素的利用效率在逐渐增加,这一结果与前人的研究结果相一致[31-32]。陈军强等人[33]在高山草甸的研究结果表明,高生产力植物群落的物种数与其 C/N 比呈负相关关系,而在较低生产力的植物群落中则呈正相关关系,我们的研究结果也同样支持这一结论。在沙地退化植被恢复过程中,虽然植被生物量逐渐增加,但其生产力仍然较低(草地生物量仅为 182.06 $g \cdot m^{-2}$)。因此,随着退化植被恢复过程中物种数的增加,植物为了生长适应环境变化,植物倾向于分配和固存相对较多的 C,从而提高其 N 素的利用效率。

4 结 论

沙地退化植被恢复过程中优势植物演替导致了植被—土壤系统中 C、N 化学计量特征的变化,沙地退化植被恢复过程中植物群落 N 素的利用效率在逐渐增加,而 5 a 的封育恢复对沙地土壤中 N 的积累过程有促进作用。

参考文献(References)

[1] 洪江涛,吴建波,王小丹. 全球气候变化对陆地植物碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2658-2665. [HONG Jiangtao, WU Jianbo, WANG Xiaodan. Effects of global climate change on the C, N and P stoichiometry of terrestrial plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9):2658-2665.]

[2] 丁小慧,宫立,王东波,等. 放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响[J]. 生态学报,2012,32(15):4722-4730. [DING Xiaohui, GONG Li, WANG Dongbo, et al. Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mogolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15):4722-4730.]

[3] 宾振钧,王静静,张文鹏,等. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(3):231-237. [BIN Zhenjun, WANG Jingjing, ZHNAG Wenpeng et al. Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3):231-237.]

[4] 胡伟芳,章文龙,张林海,等. 中国主要湿地植被氮和磷生态化学计量学特征[J]. 植物生态学报,2014,38(10):1041-1052. [HU Weifang, ZHANG Wenlong, ZHANG Linhai, et al. Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in major wetland vegetation of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(10):1041-1052.]

[5] 陈蕾,李超伦. 海洋浮游生物的生态化学计量学研究进展[J]. 应用生态学报,2014,25(10):3047-3055. [CHEN Lei, LI Chaolun. Research advances in ecological stoichiometry of marine plankton[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10):3047-3055.]

[6] 程滨,赵永军,张文广,等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报,2010,30(6):1628-1637. [CHENG Bin, ZHAO Yongjun, ZHANG Wenguang, et al. The research advances and prospect of

ecological stoichiometry[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(6):1628 - 1637.]

[7] 刘梦云. 黄土台塬区植被恢复对土壤碳组分影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011. [LIU Mengyun. Study of soil carbon fractions during vegetation restoration in tableland of Loess Plateau region[D]. Yangling:Northwest Agriculture and Forestry University,2011.]

[8] 秦海. 天童常绿阔叶林不同演替阶段植物叶片和土壤养分及其生态化学计量学研究[D]. 上海:华东师范大学,2009. [QIN Hai. Foliar and soil nutrients and its ecological stoichiometry in successional stages of evergreen broad-leaved forest in Tiantong [D]. Shanghai:East China Normal University,2009.]

[9] 苏静,赵世伟. 植被恢复对土壤团聚体分布及有机碳、全氮含量的影响[J]. 水土保持研究,2005,12(3):44 - 46. [SU Jing, ZHAO Shiwei. Influence of vegetation restoration on distribution of aggregate and organic carbon and nitrogen in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation,2005,12(3):44 - 46.]

[10] 张平良,李小刚,李银科,等. 高寒农牧交错带植被恢复对土壤有机碳、全氮含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2007,42(2):98 - 102. [ZHANG Pingliang,LI Xiaogang,LI Yinke,et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon and total nitrogen contents in the alpine agro-pastoral ecotone[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2007,42(2):98 - 102.]

[11] 程曼. 宁南山区植被恢复对团聚体中有机碳组分分布的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012. [CHENG Man. Effects of revegetation on the distribution of soil organic carbon fraction in aggregates in Ninxia loess hilly region[D]. Yangling:North West Agriculture and Forestry University,2012.]

[12] URABE J,STERNER R W. Regulation of herbivore growth by the balance of light and nutrients[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,1996,93(16):8465 - 8469.

[13] ANDERSEN T,ELSER J J,HESSEN D O. Stoichiometry and population dynamics[J]. Ecology Letters,2004,7(9):884 - 900.

[14] STERNER R W,HESSEN D O. Algal nutrient limitation and the nutrition of aquatic herbivores[J]. Annual Review of Ecology and Systematics,1994,25(1):1 - 29.

[15] STERNER R W. The ratio of nitrogen to phosphorus resupplied by herbivores:Zooplankton and the algal competitive arena[J]. The American Naturalist,1990,136(2):209 - 229.

[16] URABE J,NAKANISHI M,KAWABATA K. Contribution of metazoan plankton to the cycling of nitrogen and phosphorus in Lake Biwa[J]. Limnology and Oceanography,1995,40(2):232 - 241.

[17] HESSEN D O,AGREN G I,ANDERSON T R,et al. Carbon sequestration in ecosystems:The role of stoichiometry[J]. Ecology,2004,85(5):1179 - 1192.

[18] 刘新民,赵哈林,赵爱芬,等. 科尔沁沙地风沙环境与植被[M]. 北京:科学出版社,1996. [LIU Xinmin,ZHAO Halin,ZHAO Aifen,et al. Wind-sandy environment and vegetation in the Horqin sandy land,China[M]. Beijing:Science Press,1996.]

[19] 王涛,吴薇,薛娴,等. 近50年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. 地理学报,2004,59(2):203 - 212. [WANG Tao,WU Wei,XUE Xian,et al. Spatial-temporal changes of sandy desertified land during last five decades in northern China[J]. Acta Geographica Sinica,2004,59(2):203 - 212.]

[20] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J]. 环境科学,2010,31(8):1716 - 1725. [LI Yulin,MAO Wei,ZHAO Xueyong,et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions,north China[J]. Environmental Science,2010,31(8):1716 - 1725.]

[21] 周欣,左小安,赵学勇,等. 科尔沁沙地不同生境植物及叶片的C、N元素计量特征[J]. 干旱区地理,2015,38(3):565 - 575. [ZHOU Xin,ZUO Xiao'an,ZHAO Xueyong,et al. Ecological stoichiometry of plant and leaf carbon and nitrogen in different habitats of Horqin Sandy Land[J]. Arid Land Geography,2015,38(3):565 - 575.]

[22] 吕朋,左小安,岳喜元,等. 科尔沁沙地封育过程中植被特征的动态变化[J]. 生态学杂志,2018,37(10):2880 - 2888. [LYU Peng,ZUO Xiao'an,YUE Xiyuan,et al. Temporal changes of vegetation characteristics during the long-term grazing exclusion in Horqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Ecology,2018,37(10):2880 - 2888.]

[23] 龚春梅,宁蓬勃,王根轩,等. C_3 和 C_4 植物光合途径的适应性变化和进化[J]. 植物生态学报,2009,33(1):206 - 221. [GONG Chunmei,NING Pengbo,WANG Genxuan,et al. A review of adaptable variations and evolution of photosynthetic carbon assimilating pathway in C_3 and C_4 plants[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2009,33(1):206 - 221.]

[24] 闫恩荣. 常绿阔叶林退化过程中土壤的养分库动态及植物的养分利用策略[D]. 上海:华东师范大学,2006. [YAN Enrong. Dynamics of soil nutrient pools,nutrient use strategies of dominant trees in the typical and degraded evergreen broad-leaved forests [D]. Shanghai:East China Normal University,2006.]

[25] 白春利. 荒漠草原优势植物养分利用及化学计量特征研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013. [BAI Chunli. Study on nutrient use and stoichiometry of dominant plants in desert steppe [D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2013.]

[26] 苏静. 宁南地区植被恢复对土壤团聚体稳定性及碳库的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2005. [SU Jing. Effects of revegetation on the distribution of soil organic carbon fraction in aggregates in Ningxia loess hilly region[D]. Yangling:North West Agriculture and Forestry University,2005.]

[27] ZUO X A,ZHANG J,LV P,et al. Vegetation functional diversity mediates the effects of vegetation and soil properties on community-level vegetation nitrogen use in the restoration of semiarid sandy grassland[J]. Ecological Indicators,2016,64:272 - 280.

[28] ZUO X A,ZHANG J,ZHOU X. Changes in carbon and nitrogen storage along a restoration gradient in a semiarid sandy grassland [J]. Acta Oecologica,2015,69:1 - 8.

[29] WOLKOVICH E M,LIPSON D A,VIRGINIA R A,et al. Grass invasion causes rapid increases in ecosystem carbon and nitrogen storage in a semiarid shrubland[J]. Global Change Biology,2010,16(4):1351 - 1365.

[30] PEICHL M,LEAVA N A,KIELY G. Above-and belowground ecosystem biomass,carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland[J].

Plant and Soil,2012,350(1-2):281-296.

[31] 何树斌. 不同氮素和水分供应下紫花苜蓿碳同化和 C/N 响应机制研究[D]. 兰州:兰州大学,2012. [HE Shubin. Study on the mechanisms of carbon assimilation and C/N ratio in alfalfa responding to nitrogen and water availabilities[D]. Lanzhou:Lanzhou University,2012.]

[32] 展小云,于贵瑞,盛文萍,等. 中国东部南北样带森林优势植物叶片的水分利用效率和氮素利用效率[J]. 应用生态学报,2012,23(3):587-594. [ZHAN Xiaoyun,YU Guirui,SHENG Wenping,et al. Foliar water use efficiency and nitrogen use efficiency of dominant plant species in main forests along the North-South Transect of East China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(3):587-594.]

[33] 陈军强,张蕊,侯尧宸,等. 亚高山草甸植物群落物种多样性与群落 C、N、P 生态化学计量的关系[J]. 植物生态学报,2013,37(11):979-987. [CHEN Junqiang,ZHANG Rui,HOU Yaochen,et al. Relationships between species diversity and C,N and P ecological stoichiometry in plant communities of sub-alpine meadow[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2013,37(11):979-987.]

Changes of carbon and nitrogen stoichiometry in the restoration process of degraded vegetation in Horqin Sandy Land

LYU Peng[1,2,3], ZUO Xiao-an[1,2], SUN Shan-shan[1,3], ZHANG Jing[1,2,3], ZHAO Sheng-long[2,3], CHENG Qing-ping[2,3], HU Ya[2,3]

(1 *Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*; 2 *Urat Desert-grassland Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In this paper, the carbon and nitrogen stoichiometric amounts of plant-soil system were investigated along with the restoration sequence of degraded vegetation in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China. This would be helpful to definite the changes of carbon-nitrogen stoichiometric amounts of plant-soil system in the restoration of degraded vegetation and quantify the relationship between carbon-nitrogen stoichiometric amounts and species richness, which provided the theoretical foundation for the sustainable management and utilization of sandy grassland. A total of 24 plots with the size of 20 m × 20 m were set up at four habitats (mobile dune, semi-fixed dune, fixed dune and grassland), each habitat had 6 replicated plots. The distance between each plot was in the range from 0.5 to 8 km. Three quadrats with the size of 1 m × 1 m were selected for plant and soil sampling in each plot in mid-August of 2011, 2013 and 2015. Then the C and N contents of plant-soil system were analysed by Costech Elemental Combustion System 4010, Italy. The resluts shown as follows: (1) With the restoration of degraded vegetation, the C and N contents and C/N ratios of aboveground plant, litter and root had a fluctuated change trend, while the C and N content and C/N ratio of soil (0~10 cm) was increased significantly ($P<0.05$). The N content of aboveground plant in mobile dune was the highest, thus the C/N ratio was much lower than other habitats. On the other hand, the N contents of litter and root in semi-fixed dune were relatively lower than other habitats, which led to the higher C/N ratios of litter and root in semi-fixed dune. (2) From 2011 to 2015, the average C content of above ground plant changed a little, while the N content was significantly increased ($P<0.01$). The C and N content and C/N ratio of litter fluctuated smoothly, while there was no significant difference of that for root between years. On the other hand, the C content and C/N ratio of soil changed undulately, but the N content was increased significantly ($P<0.01$). (3) The C/N ratio of aboveground plant, litter, soil had positive linear relationship with species richness in the restoration process of degraded vegetation ($P<0.01$). In conclusion, the succession of dominant vegetation in the restoration process of degraded vegetation led to the changes of C and N stoichiometric amounts of plant-soil system, the N use efficiency was also increased with the restoration of degraded vegetation. Moreover, the increase of fencing time promotes the accumulation of soil N in sandy land.

Key words: C and N contents; C/N ratios; restoration of degraded vegetation; restoration ages; Horqin Sandy Land